

(12) NACH DEM VERFOLGUNG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
19. Februar 2004 (19.02.2004)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2004/015789 A2**

(51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: **H01L 41/09**,  
41/083, 41/24

[DE/DE]; Röntgenstr. 20, 85521 Ottobrunn (DE).  
WOLFF, Andreas [DE/DE]; Bajuwarenstr. 28, 81825 München (DE). MURMANN-BIESENECKER, Hedwig [DE/DE]; Roter Hügel 12, 96277 Schneckenlohe (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2003/002586

(74) Gemeinsamer Vertreter: SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT; Postfach 22 16 34, 80506 München (DE).

(22) Internationales Anmeldedatum:  
31. Juli 2003 (31.07.2003)

(81) Bestimmungsstaaten (*national*): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(84) Bestimmungsstaaten (*regional*): ARIPO-Patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ,

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch  
(30) Angaben zur Priorität:  
102 34 917.7 31. Juli 2002 (31.07.2002) DE

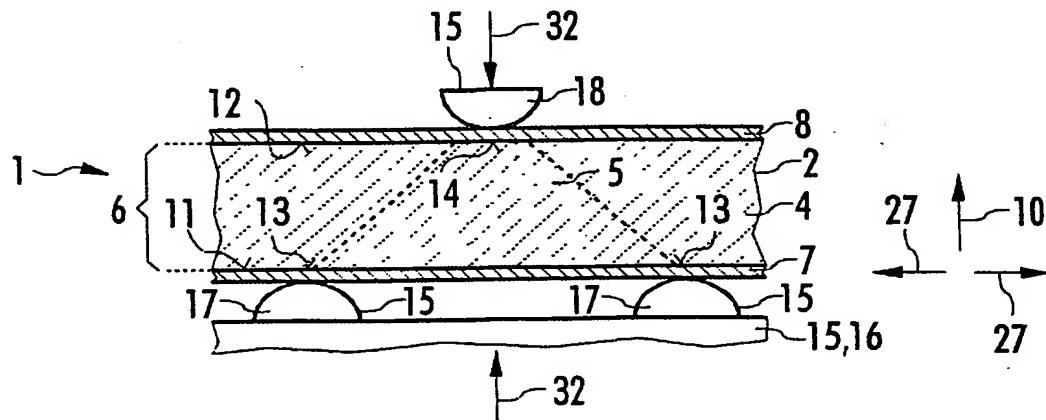
*[Fortsetzung auf der nächsten Seite]*

(71) Anmelder (*für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US*): SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT [DE/DE]; Wittelsbacherplatz 2, 80333 München (DE).

(72) Erfinder; und  
(75) Erfinder/Anmelder (*nur für US*): LUBITZ, Karl

(54) Title: PIEZOACTUATOR AND METHOD FOR PRODUCTION OF THE PIEZOACTUATOR

(54) Bezeichnung: PIEZOAKTOR UND VERFAHREN ZUM HERSTELLEN DES PIEZOAKTORS



(57) Abstract: The invention relates to a piezoactuator (1), comprising at least one stacked piezoelement (2), with at least two electrode layers (7, 8), arranged one over the other along a stacking direction (10) of the piezoelement, at least one piezoelectric layer (4), arranged between two of the electrode layers and at least one pre-tensioning device (15), for introduction of force into a volume of the piezoelectric layer by means of at least one force introduction surface (13, 14) on the piezoelectric layer, which is arranged on at least one of the surface sections (11, 12) facing the pretensioning device. The piezoactuator is characterised in that the force introduction surface is smaller than the surface section of the piezoelectric layer and that the volume is a partial volume (5) of the piezoelectric layer. The production of the piezoactuator is achieved by means of introduction of a force into the partial volume of the piezoelectric layer by means of the force introduction surface on the piezoelectric layer. The force is introduced such that, in the partial volume of the piezoelectric layer, a switching of the polarisation of the domains is generated transverse to the stacking direction. The piezoactuator is characterised by a large relative stroke in the percentage range, whereby forces of several tenths of a Newton per contact surface pair can be transmitted.

*[Fortsetzung auf der nächsten Seite]*

WO 2004/015789 A2



TM), europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI-Patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

**Veröffentlicht:**

- ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

**(57) Zusammenfassung:** Die Erfindung betrifft einen Piezoaktor (1) mit mindestens einem stapelförmigen Piezoelement (2), das mindestens zwei entlang einer Stapelrichtung (10) des Piezoelements übereinander angeordnete Elektrodenschichten (7, 8) und mindestens eine jeweils zwischen zwei Elektrodenschichten angeordnete piezoelektrische Schicht (4) aufweist, und mindestens einer Vorspannvorrichtung (15) zur Krafteinleitung in ein Volumen der piezoelektrischen Schicht über mindestens eine Krafteinleitungsfläche (13, 14) der piezoelektrischen Schicht, die an mindestens einem der Vorspannvorrichtung zugekehrten Oberflächenabschnitt (11, 12) der piezoelektrischen Schicht angeordnet ist. Der Piezoaktor ist dadurch gekennzeichnet, dass die Krafteinleitungsfläche kleiner ist als der Oberflächenabschnitt der piezoelektrischen Schicht und dass das Volumen ein Teilvolumen (5) der piezoelektrischen Schicht ist. Das Herstellen des Piezoaktors erfolgt durch Einleiten einer Kraft in das Teilvolumen der piezoelektrischen Schicht über die Krafteinleitungsfläche der piezoelektrischen Schicht. Die Kraft wird derart eingeleitet, dass in dem Teilvolumen der piezoelektrischen Schicht ein Umschalten der Polarisierung der Domänen quer zur Stapelrichtung hervorgerufen wird. Der Piezoaktor zeichnet sich durch einen großen relativen Hub im Prozentbereich aus, wobei Kräfte von einigen zehntel Newton pro Kontaktflächenpaar übertragen werden können.

## Beschreibung

**Piezoaktor und Verfahren zum Herstellen des Piezoaktors**

5 Die Erfindung betrifft einen Piezoaktor mit mindestens einem stapelförmigen Piezoelement, das mindestens zwei entlang einer Stapelrichtung des Piezoelements übereinander angeordnete Elektrodenschichten und mindestens eine jeweils zwischen zwei Elektrodenschichten angeordnete

10 piezoelektrische Schicht aufweist, und mindestens einer Vorspannvorrichtung zur Krafteinleitung in ein Volumen der piezoelektrischen Schicht über mindestens eine Krafteinleitungsfläche der piezoelektrischen Schicht, die an mindestens einem der Vorspannvorrichtung zugekehrten

15 Oberflächenabschnitt der piezoelektrischen Schicht angeordnet ist. Daneben wird ein Verfahren zum Herstellen des Piezoaktors angegeben.

Ein Piezoaktor der genannten Art ist aus US 6 274 967 B1 bekannt. Der Piezoaktor weist ein Piezoelement in Vielschichtbauweise auf. Bei einem derartigen Piezoelement sind viele Elektrodenschichten und piezoelektrische Schichten abwechselnd übereinander gestapelt. Die piezoelektrischen Schichten bestehen aus einem piezokeramischen Material. Die Vorspannvorrichtung zur Krafteinleitung in das jeweilige Volumen der einzelnen piezoelektrischen Schichten besteht aus einem hohlzyndrisches Federelement, einem Aktordeckel und einem Aktorboden. Das Piezoelement ist mit seinen zwei Stirnflächen zwischen dem Aktordeckel und dem Aktorboden mit Hilfe des Federelements vorgespannt. Mit Hilfe der Vorspannvorrichtung wird in ein Gesamtvolume jeder der piezoelektrischen Schichten eine Kraft eingeleitet. Die piezoelektrischen Schichten werden mit einer einachsigen Druckspannung entlang der Stapelrichtung beaufschlagt. Die eingeleitete Kraft bzw. die eingeleitete Druckspannung führt zur einem Domänenumschalten. Die Polarisation der Domänen

werden bevorzugt quer zur Krafteinleitungsrichtung bzw. Stapelrichtung orientiert.

Zur Krafteinleitung in das Gesamtvolume jeder der  
5 piezoelektrischen Schichten weist jede der piezoelektrischen Schichten von einander abgekehrte Oberflächenabschnitte auf, die parallel zu den Stirnflächen des Piezoelements ausgerichtet sind. Diese Oberflächenabschnitte sind entweder dem Aktordeckel oder dem Aktorboden der Vorspannvorrichtung  
10 zugekehrt. Die Oberflächenabschnitte sind so groß wie die Stirnflächen des Piezoelements. Über jeweils den gesamten Oberflächenabschnitt der piezoelektrischen Schicht kommt es zur Krafteinleitung in das Gesamtvolume der piezoelektrischen Schicht.

15 Der bekannte Piezoaktor wird beispielsweise zur Ansteuerung eines Einspritzventils in einem sogenannten Common Rail Einspritzsystem eingesetzt. Dabei ist es erforderlich, dass sowohl eine bestimmte Auslenkung als auch eine bestimmte  
20 Kraft entlang der Stapelrichtung übertragen werden kann.

Ein Maß für eine Auslenkbarkeit des piezoelektrischen Materials in Richtung einer angelegten elektrischen Feldstärke ist die sogenannte piezoelektrische  
25 Ladungskonstante  $d_{33}$ . Um eine relativ große Auslenkung zu erzielen, wird beispielsweise bei einem gegebenen  $d_{33}$ -Wert die Gesamthöhe des Piezoelements vergrößert. Alternativ dazu kann eine relativ große Auslenkung durch Einleiten einer Kraft bzw. einer einachsigen Druckspannung entlang der  
30 Stapelrichtung des Piezoelements erzielt werden. Dazu werden beispielsweise in einem unpolarisierten Piezoelement die statistisch verteilten ferroelektrischen Domänen über einen sogenannten ferroelastischen Prozess bevorzugt quer zur angelegten Druckspannung bzw. quer zur Stapelrichtung  
35 geschaltet. Dies führt zu einer bleibenden Verkürzung des Piezoelements. Dieses verkürzte Piezoelement wird elektrisch angesteuert. Durch Anlegen eines elektrischen Feldes parallel

zur Stapelrichtung kommt es zum Domänenschalten mit einer Vorzugsrichtung parallel zum angelegten elektrischen Feld. Es werden im Vergleich zum Piezoelement ohne Druckvorspannung wesentlich mehr Domänen umgeschaltet. Es resultiert damit 5 eine im Vergleich zum Piezoelement ohne Druckvorspannung höhere Auslenkung des Piezoelements in Stapelrichtung.

Um auf diese Weise eine erhöhte Auslenkung in einem stapelförmigen Piezoelement in monolithischer 10 Vielschichtbauweise erzielen zu können, wäre beispielsweise bei einer Grundfläche des Piezoelements von  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  eine Kraft von über 100 N nötig. Bei einer Grundfläche von  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  wäre eine Kraft von etwa 2,5 kN nötig. Dies lässt sich nur mit Hilfe einer steifen Feder mit entsprechender Einbusse 15 an Leerlaufauslenkung bewerkstelligen.

Die Erhöhung der Auslenkung mit Hilfe der Druckvorspannung ist aber nicht nur für Piezoaktoren im Makromaaßstab problematisch. Insbesondere zur Realisierung eines 20 Piezoaktors mit relativ großer Auslenkung und Kraftübersetzung im Mikromaaßstab ist die Erhöhung der Auslenkung mit Hilfe der Druckvorspannung nicht geeignet.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, einen Aktor 5 bereitzustellen, der als Mikroaktor einsetzbar ist und der eine im Vergleich zum bekannten Stand der Technik sehr große relative Auslenkung aufweist.

Die Aufgabe wird durch einen Piezoaktor gelöst mit mindestens 30 einem stapelförmigen Piezoelement, das mindestens zwei entlang einer Stapelrichtung des Piezoelements übereinander angeordnete Elektrodenschichten und mindestens eine jeweils zwischen zwei Elektrodenschichten angeordnete piezoelektrische Schicht aufweist, und mindestens einer 35 Vorspannvorrichtung zur Krafteinleitung in ein Volumen der piezoelektrischen Schicht über mindestens eine Krafteinleitungsfläche der piezoelektrischen Schicht, die an

mindestens einem der Vorspannvorrichtung zugekehrten Oberflächenabschnitt der piezoelektrischen Schicht angeordnet ist. Der Piezoaktor ist dadurch gekennzeichnet, dass die Krafteinleitungsfläche kleiner ist als der

5 Oberflächenabschnitt der piezoelektrischen Schicht und dass das Volumen ein Teilvolumen der piezoelektrischen Schicht ist. Dieses Teilvolumen ist aktorisch wirksam.

Zur Lösung der Aufgabe wird auch ein Verfahren zum Herstellen  
10 des Piezoaktors durch Einleiten einer Kraft in ein Teilvolumen der piezoelektrischen Schicht über die Krafteinleitungsfläche der piezoelektrischen Schicht angegeben. Die Kraft wird derart eingeleitet, dass in dem Teilvolumen der piezoelektrischen Schicht eine Polarisierung  
15 quer zur Stapelrichtung erzeugt wird. Die Polarisierung der Domänen des Teilvolumens werden bevorzugt quer zur Stapelrichtung orientiert. Es wird das aktorisch wirksame Teilvolumen erzeugt.

20 Vorzugsweise befindet sich das Piezoelement in einem nicht elektrisch angesteuerten Zustand. Es ist kein elektrisches Feld angelegt. Durch die Vorspannvorrichtung wird entlang der Stapelrichtung mittelbar über die Krafteinleitungsflächen eine lokal begrenzte Kraft bzw. lokal begrenzte mechanische  
25 Druckspannung in ein Teilvolumen der piezoelektrischen Schicht eingeleitet. Durch diese mechanische Druckspannung werden die in einer unpolarisierten piezoelektrischen Schicht statistisch verteilten oder in einer normal polarisierten piezoelektrischen Schicht parallel zur Druckeinleitung  
30 orientierten ferroelektrischen Domänen des Teilvolumens der piezoelektrischen Schicht in eine Vorzugsrichtung quer zur angelegten mechanischen Druckspannung geschaltet. Dies führt zu einer bleibenden Verformung beziehungsweise Verkürzung der piezoelektrischen Schicht im Bereich des Teilvolumens. Eine  
35 Schichtdicke der piezoelektrischen Schicht ist verkleinert. Es resultiert ein verformtes beziehungsweise verkürztes Piezoelement.

Wird das so erzeugte Piezoelement in Polungsrichtung (parallel zur Stapelrichtung) mit einer elektrischen Feldstärke angesteuert, werden alle Domänen sowohl innerhalb 5 als auch außerhalb des Teilvolumens der piezoelektrischen Schicht näherungsweise parallel zur Polungsrichtung geschaltet. Bei diesem Schaltprozess bleibt der Piezoaktor im Bereich des Teilvolumens der piezoelektrischen Schicht unter Druckspannung. Allerdings wird eine erhöhte Auslenkung in 10 Stapelrichtung des Piezoelements gemessen. Die erhöhte Auslenkung ist das Ergebnis eines erhöhten  $d_{33}$ -Werts.

In einer besonderen Ausgestaltung sind mehrere Krafteinleitungsflächen derart über die piezoelektrische 15 Schicht verteilt, dass es durch die Krafteinleitung zu einer Verbiegung der piezoelektrischen Schicht kommt. Beispielsweise ist die piezoelektrische Schicht eine piezokeramische Schicht aus Bleizirkonattitanat. Die durch die Krafteinleitung initiierte Verbiegung resultiert aus 20 einer elastischen Durchbiegung der piezoelektrischen Schicht. Bei geeigneter Abstimmung der Krafteinleitungsflächen, einer Schichtdicke der piezokeramischen Schicht und der eingeleiteten Kraft kann die elastische Durchbiegung durch 25 eine ferroelastische Durchbiegung überlagert sein. Ein an der Vorspannvorrichtung messbarer Hub setzt sich aus einer Verringerung der Durchbiegung, einer Erhöhung der Schichtdicke der piezokeramischen Schicht durch 90°-Domänenschalten und einer Erhöhung der Schichtdicke durch den normalen Piezoeffekt zusammen. Bezogen auf eine 30 Ausgangsschichtdicke der piezoelektrischen Schicht werden beispielsweise bei einer Feldstärke von 1 kV/mm  $d_{33}$ -Werte von bis zu 15.000 pm/V gemessen. Dies entspricht einer Huberhöhung um einen Faktor 10 gegenüber bisherigen Aktorlösungen.

In einer besonderen Ausgestaltung wird ein Teilvolumen verwendet, das sich entlang einer gesamten Schichtdicke der

piezoelektrischen Schicht erstreckt. Es wird ein Teilvolumen erzeugt, das sich von einem Oberflächenabschnitt der piezoelektrischen Schicht zum anderen Oberflächenabschnitt erstreckt. Das Teilvolumen durchsetzt die piezoelektrische 5 Schicht vollständig in Dickenrichtung.

Vorzugsweise wird in diesem Teilvolumen eine im Wesentlichen vollständige Polarisierung quer zur Stapelrichtung erzeugt. Es wird im Teilvolumen mit Hilfe der mechanischen Druckspannung 10 eine nahezu vollständige Domänenumschaltung quer zur einleitenden Druckspannung erreicht oder überschritten. Die dazu aufzubringende Druckspannung hängt dabei vom verwendeten piezoelektrischen Material der piezoelektrischen Schicht ab. Die Druckspannung ist beispielsweise um so niedriger, je 15 niedriger die Curie-Temperatur  $T_c$  oder je niedriger die Koerzitivfeldstärke  $E_c$  des piezoelektrischen Materials ist.

In einer besonderen Ausgestaltung weisen die Vorspannvorrichtung und/oder das Piezoelement zur Erzeugung 20 der Krafteinleitungsfläche mindestens eine aus der Gruppe Kugelkalotte (Kugelkappe), Kegelstumpf, Quader, Ring und/oder Zylinder ausgewählte Bauform auf. Denkbar ist auch ein Prisma. Diese Bauformen ermöglichen insbesondere die Realisierung sowohl von punktförmigen als auch von 25 streifenförmigen Krafteinleitungsflächen. Punktformig bedeutet dabei, dass die Krafteinleitungsfläche durch eine kreisförmige oder näherungsweise kreisförmige Fläche beschrieben werden kann. Die Krafteinleitungsfläche kann dabei, wie im Fall des Ringes, sowohl kreisrund, oval oder 30 quadratisch sein. Beispielsweise verfügt die Vorspannvorrichtung über einen Stempel in Form eines Quaders mit einer quadratischen Grundfläche oder in Form eines Zylinders mit einer runden Grundfläche. Über diese Grundflächen wird die mechanische Druckvorspannung auf das 35 Piezoelement übertragen. Der Grundfläche des Stempels entsprechend wird dabei die mechanische Druckvorspannung über eine runde oder quadratische Krafteinleitungsfläche der

piezoelektrischen Schicht in das Teilvolumen der piezoelektrischen Schicht eingeleitet. Weist der Quader eine rechteckige Grundfläche auf, wird die Kraft entlang einer streifenförmigen Krafteinleitungsfläche in ein entsprechend 5 geformtes Teilvolumen der piezoelektrischen Schicht eingeleitet. Denkbar ist auch, dass bei einem Zylinder die Kraft nicht über eine Grundfläche, sondern über eine Mantelfläche eingeleitet wird. Dabei liegt beispielsweise eine linienförmige Krafteinleitungsfläche vor.

10

Denkbar ist auch, dass die Krafteinleitungsflächen mit Hilfe einer strukturierten Elektrodenschicht des Piezoelements realisiert sind. Mit Hilfe der strukturierten Elektrodenschichten wird in die piezoelektrische Schicht nur 15 an bestimmten Stellen die Kraft eingeleitet. Nur an diesen Stellen kommt es in Folge der Krafteinleitung zu einem Domänenumschalten. Zur Strukturierung der Elektrodenschicht sind alle bekannten Verfahren aus der Mikrostrukturierung anwendbar.

20

In einer besonderen Ausgestaltung wird eine Vielzahl von Teilvolumina in der piezoelektrischen Schicht erzeugt. Die Teilvolumina sind dabei vorzugsweise voneinander getrennt. Dies bedeutet, dass über mehrere Krafteinleitungsflächen in 5 der piezoelektrischen Schicht das Umschalten der Polarisation der Domänen quer zur Stapelrichtung erzeugt wird. Die über die Krafteinleitungsflächen eingeleitete Druckspannung ist dabei vorzugsweise gleich. Dies bedeutet beispielsweise, dass bei gleicher Größe der Krafteinleitungsflächen jeweils eine 30 gleiche Kraft über die Vorspannvorrichtung auf die Krafteinleitungsflächen ausgeübt wird.

Insbesondere sind mindestens drei Krafteinleitungsflächen vorhanden, die über den Oberflächenabschnitt der 35 piezoelektrischen Schicht flächig verteilt sind. Bei drei flächig verteilten Krafteinleitungsflächen lässt sich relativ leicht eine gleiche Druckspannung in die Teilvolumina

einbringen. Es resultiert eine Kraftvervielfachung durch eine Vergrößerung der gesamten Krafteinleitungsfläche. Zum Krafteinleiten muss eine größere Kraft aufgewendet werden. Es ist aber auch eine größere Kraft abrufbar.

5

In einer besonderen Ausgestaltung sind mindestens drei Krafteinleitungsflächen vorhanden, die am Oberflächenabschnitt der piezoelektrischen Schicht in einer Reihe angeordnet sind. Beispielsweise können auf diese Weise 0 streifenförmige Krafteinleitungsflächen parallel zueinander über dem Oberflächenabschnitt verteilt sein. Denkbar ist auch, dass eine Vielzahl von punktförmigen Krafteinleitungsflächen eine Matrix aus Krafteinleitungsflächen bilden. Es resultiert damit eine 15 entsprechende Matrix von Teilvolumina in der piezoelektrischen Schicht.

Die an einander abgekehrten Oberflächenabschnitten der piezoelektrischen Schicht angeordneten 20 Krafteinleitungsflächen können sowohl bezüglich ihrer Form als auch bezüglich ihrer Größe unterschiedlich sein. Beispielsweise ist die Krafteinleitungsfläche eines der Oberflächenabschnitte punktförmig. Die Krafteinleitungsfläche des anderen Oberflächenabschnitts kann dagegen streifenförmig 25 sein.

Zur Erzeugung eines sich in Dickenrichtung erstreckenden Teilvolumens weisen in einer besonderen Ausgestaltung einander abgekehrte Oberflächenabschnitte der piezoelektrischen Schicht im Wesentlichen gleich und/oder 30 unterschiedlich geformte Krafteinleitungsflächen auf. Im Wesentlichen gleich bedeutet dabei, dass die Krafteinleitungsflächen mit einer Abweichung von bis zu 10% gleich groß sind. Unterschiedlich geformte Krafteinleitungsflächen liegen beispielsweise dann vor, wenn 35 die Krafteinleitungsfläche des einen Oberflächenabschnitts der piezoelektrischen punktförmig und die weitere Krafteinleitungsfläche des weiteren Oberflächenabschnitts

dagegen ringförmig ist. Diese Krafteinleitungsflächen sind derart übereinander angeordnet, dass die punktförmige Krafteinleitungsfläche im Zentrum der ringförmigen Krafteinleitungsfläche liegt.

5

In einer besonderen Ausgestaltung ist die Schichtdicke der piezoelektrischen Schicht aus dem Bereich von einschließlich 20 µm bis einschließlich 200 µm ausgewählt. Es hat sich gezeigt, dass sich bei diesen Schichtdicken auch bei  
10 Anwendung einer kleinen Kraft ein deutlich erhöhter  $d_{33}$ -Wert einstellt.

In einer besonderen Ausgestaltung weist die Krafteinleitungsfläche eine Ausdehnung auf, die im  
15 Wesentlichen der Schichtdicke der piezoelektrischen Schicht entspricht. Die Ausdehnung ist beispielsweise ein Durchmesser oder eine Kantenlänge der Krafteinleitungsfläche. Bei der oben beschriebenen Kombination aus punkt- und ringförmigen Krafteinleitungsflächen ist ein Ringdurchmesser der  
20 ringförmigen Krafteinleitungsfläche dagegen deutlich höher. Der Ringdurchmesser beträgt beispielweise 500 µm. Denkbar ist auch ein Ringdurchmesser von bis zu 1 mm.

In einer besonderen Ausgestaltung ist eine Vielzahl von  
25 Piezoelementen übereinander gestapelt. Vorzugsweise sind dabei mindestens zwei Piezoelemente derart über einander gestapelt, dass Krafteinleitungsflächen der Piezoelemente im Wesentlichen bündig übereinander angeordnet sind. Die Teilvolumina einer jeden piezoelektrischen Schicht sind in  
30 Stapelrichtung über den Teilvolumina der piezoelektrischen Schicht weiterer Piezoelemente übereinander angeordnet. Dadurch resultiert zusätzlich zur außergewöhnlichen Auslenkungshöhe eines jeden einzelnen Piezoelements ein Piezoaktor mit einer extrem hohen Auslenkung. Es resultiert  
35 eine Hubvervielfachung. Eine Kraft, die zur hohen Auslenkung in das Volumen der piezoelektrischen Schichten eingebracht werden muss, ist dabei relativ klein.

Zusammenfassend ergeben sich mit der Erfindung folgende besonderen Vorteile:

- 5 • Durch die Art der Krafteintragung in ein Teilvolumen der piezoelektrischen Schicht wird ein Piezoelement erhalten mit einem deutlich größeren Hub. Damit lässt sich beispielsweise ein Mikroaktor mit einer Bauhöhe von 1 mm und einem Hub von 10 µm realisieren.
- 10 • Bei halbem Leerlaufhub eines Mikroaktors ist dabei eine Arbeitskraft von 10 - 20 cN erzielbar.
- 15 • Kraft und mechanische Arbeit sind durch geeignet gestapelte Piezoelemente vervielfältigbar und für viele Anwendungen einstellbar.
- 20 • Durch Verbindung von piezokeramischer Vielschichttechnologie, Mikrostrukturierung und Mikromechanik bietet die Erfindung Lösungen für viele Anwendungsgebiete (Mikropumpen, Mikroventile, Mikromotoren etc.).

Anhand mehrerer Beispiele und der dazugehörigen Figuren wird  
25 die Erfindung im Folgenden näher beschrieben. Es werden einzelne Ausgestaltungen der Erfindung beschrieben, die in beliebiger Form miteinander kombiniert werden können. Die Figuren sind schematisch und stellen keine maßstabsgereuen Abbildungen dar.

30 Figuren 1 bis 7 zeigen jeweils eine Ausschnitt verschiedener Piezoaktoren im seitlichen Querschnitt.

Figuren 8 bis 10 zeigen jeweils einen Ausschnitt einer  
35 piezoelektrischen Schicht mit Krafteinleitungsflächen in Aufsicht auf die piezoelektrische Schicht.

Figur 11 zeigt einen Piezoaktor in perspektivischer Darstellung, bei dem eine streifenförmige Krafteinleitungsfläche realisiert ist.

5

Figur 12 zeigt ein Piezoelement in Vielschichtbauweise.

0

Der Piezoaktor 1 gemäß Figuren 1 bis 9 weist jeweils mindestens ein stapelförmiges Piezoelement 2 aus zwei entlang der einer Stapelrichtung 10 des Piezoelements 2 übereinander angeordneten Elektrodenschichten 7 und 8 und einer zwischen den Elektrodenschichten 7 und 8 angeordneten piezoelektrischen Schicht 4 auf. Die piezoelektrische Schicht 4 besteht aus einem Weich-PZT. Die Curietemperatur  $T_c$  beträgt etwa 170°C. Die Koerzitivfeldstärke  $E_c$  des Weich-PZTs liegt bei 0,5 kV/mm. Die Schichtdicke 6 der piezoelektrischen Schicht 4 beträgt etwa 120 µm.

5

Der Piezoaktor 1 verfügt jeweils über eine Vorspannvorrichtung 15 zur Krafteinleitung in ein Teilvolumen 5 der piezoelektrischen Schicht 4. Über die Krafteinleitungsflächen 13 und 14 wird in das Teilvolumen 5 der piezoelektrischen Schicht 4 eine Kraft 32 eingeleitet. Die Krafteinleitungsflächen 13 und 14 sind an den der Vorspannvorrichtung 15 zugekehrten Oberflächenabschnitten 11 und 12 der piezoelektrischen Schicht 4 angeordnet. Die Oberflächenabschnitte 11 und 12 sind dabei voneinander abgekehrt. Zumindest eine der Krafteinleitungsflächen 13 oder 14 ist kleiner als der zugehörige Oberflächenabschnitt 11 oder 12 der piezoelektrischen Schicht 4.

30

Zur Erzeugung der Krafteinleitungsflächen 13 und 14 steht die Vorspannvorrichtung 15 mit den Elektrodenschichten 7 und 8 mechanisch in Kontakt. Über die Elektrodenschichten 7 und 8 werden mittelbar die Krafteinleitungsflächen 13 und 14 der Oberflächenabschnitte 11 und 12 der piezoelektrischen Schicht 4 erzeugt. Ein Ausmaß der Krafteinleitungsflächen 13 und 14

35

entspricht im Wesentlichen einer jeweiligen mechanischen Kontaktfläche zwischen der Vorspannvorrichtung 15 und der entsprechenden Elektrodenschicht 7 und 8.

5 Die Krafteinleitungsflächen 13 und 14 sind in Stapelrichtung 19 des Piezoelements 2 derart über die piezoelektrische Schicht 4 verteilt, dass durch die Krafteinleitung eine Verbiegung des piezoelektrischen Schicht 4 hervorgerufen wird.

10

Gemäß Figur 1 verfügt die Vorspannvorrichtung 15 über mindesten eine Kugelkalotte 18 und über mindestens einen Auflagering 17 (vgl. Figur 8, Bezugszeichen 23 und 23') Der Auflagering 17 weist einen Querschnitt einer Kugelkalotte auf. Der Auflagering 17 ist mit einer Basis 16 der Vorspannvorrichtung 15 verbunden. Mit Hilfe einer nicht gezeigten Feder wird die in das Teilvolumen der piezoelektrischen Schicht 4 einzuleitende Kraft 32 auf die Kugelkalotte 18 übertragen. Der Auflagering 17 und die 15 Kugelkalotte 18 sind einander gegenüber liegenden und mit jeweils einer der Elektrodenschichten 7 und 8 in mechanischem Kontakt stehend angeordnet. Die Kugelkalotte 18 führt zu einer punktförmigen Krafteinleitungsfläche 14. Der Durchmesser der punktförmigen Krafteinleitungsfläche beträgt 20 etwa 50 µm. Der Auflagering 17 führt zu einer ringförmigen Krafteinleitungsfläche 13 mit einem Ringdurchmesser von etwa 500 µm. Die Kugelkalotte 18 und der Ring 17 sind dabei derart angeordnet, dass die punktförmige Krafteinleitungsfläche 14 im Zentrum der ringförmigen Krafteinleitungsfläche 13 25 angeordnet ist. Durch Anlegen einer Druckspannung wird über die Krafteinleitungsflächen 13 und 14 eine Kraft 32 in das Teilvolumen 5 der piezoelektrischen Schicht 4 eingeleitet. Als Folge davon kommt es in dem Teilvolumen 5 zu einem Umschalten der Polarisierung 27 der Domänen quer zur 30 Stapelrichtung 10. Das Teilvolumen 5 erstreckt sich in Stapelrichtung 10 des Piezoelements 2 entlang der gesamten 35

Schichtdicke 6 der piezoelektrischen Schicht 4. Die Polarisation erfolgt im Teilvolumen 5 nahezu vollständig. Im Unterschied zum vorangegangenen Beispiel wird die punktförmige Krafteinleitungsfläche 14 gemäß Figur 2 mit Hilfe eines Kegelstumpfs 20 und gemäß Figur 3 mit Hilfe eines Zylinders 22 erzeugt. Der Auflagering 17 weist gemäß Figur 2 eine Querschnitt eines Kegelstumpfs 19 und gemäß Figur 3 eine Querschnitt eines Zylinders 21 auf. In einer weiteren Ausführung gemäß Figur 11 werden mit Hilfe von Quadern 30 und 31 mit rechteckiger Grundfläche streifenförmige Krafteinleitungsflächen 24 und 24' erzeugt, die in Reihe 25 bzw. 25' angeordnet sind (vgl. Figur 9).

Zum Erzeugen der Krafteinleitungsflächen verfügen gemäß Figur 4 sowohl die Vorspannvorrichtung 15 als auch das Piezoelement 2 über Zylinder 22 und 21 mit punktförmiger Grundfläche. Der Zylinder 21 des Piezoelements 2 ist dabei mit Hilfe einer strukturierten Elektrodenschicht 9 realisiert. Die Zylinder 22 der Vorspannvorrichtung 15 und die Zylinder 21 des Piezoelements 2 sind bezüglich der Stapelrichtung 10 gegeneinander versetzt. Durch Auswahl des Materials der piezoelektrischen Schicht und der Elektrodenschichten kann eine Verbiegung des Stapels ermöglicht werden. Bei Anlegen der Druckspannung kann es dabei zu einer besonders großen Huberhöhung kommen.

In Figur 5 ist eine weitere Ausführungsform angedeutet, bei der mehrere Zylinder zu den Oberflächenabschnitten 11 und 12 in Reihe 25 angeordnet sind. Wenn die Grundflächen der Zylinder streifenförmig sind, resultieren streifenförmige Krafteinleitungsflächen 24 und 24' (Figur 9). Die Krafteinleitungsflächen 24 und 24' sind gegeneinander versetzt. Figur 10 stellt eine Variante der streifenförmigen Krafteinleitungsflächen 24 und 24' dar. Die streifenförmigen Krafteinleitungsflächen 24 und 24' sind jeweils quer zur Längsrichtung der Streifen über Stege miteinander verbunden.

Die Krafteinleitung in die piezoelektrische Schicht 4 erfolgt netzartig.

Eine weitere Ausführungsform ist in Figur 8 dargestellt. Eine  
5 Vielzahl von punktförmigen Krafteinleitungsflächen 23 ist über einen Oberflächenabschnitt 11 und eine Vielzahl von ringförmigen Krafteinleitungsflächen 23' über den weiteren Oberflächenabschnitt 12 der piezoelektrischen Schicht 4 jeweils in Form einer Matrix 26 und 26' verteilt.

10 Die Figuren 6 und 7 zeigen zwei Ausführungsbeispiele, bei denen zwei Piezoelemente 2 derart gestapelt sind, dass die Krafteinleitungsflächen 13, 14 der Piezoelemente 2 bündig übereinander angeordnet sind. Zur Krafteinleitung in die  
15 piezoelektrischen Schichten 2 ist gemäß Figur 6 zwischen den Piezoelementen 2 eine strukturierte Metallfolie 28 eingebracht. Figur 7 stellt dagegen einer Erweiterung des Ausführungsbeispiels gemäß Figur 4 dar. Zur Krafteinleitung weisen die Elektrodenschichten 9 zumindest zum Teil Zylinder 20 auf. Die Elektrodenschichten 9 sind strukturiert. Zur Anpassung eines Kraftschlusses ist zwischen den strukturierten Elektrodenschichten 9 der gestapelten Piezoelemente 2 eine Metallzwischenfolie 29 angeordnet.

25 Weitere Ausführungsformen ergeben sich dadurch, dass Piezoelemente 3 in Vielschichtbauweise verwendet werden, bei denen mehrere Elektrodenschichten 7 und piezoelektrische Schichten 4 übereinander abwechselnd angeordnet sind (Figur 12). Gemäß einer weiteren Ausführungsform sind die äußeren  
30 Elektrodenschichten 7 strukturierte Elektrodenschichten 9.

Basierend auf dem Piezoaktor 1 gemäß Figur 1 wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Messergebnisse erzielt. Das Piezoelement 2 wurde mit einer statischen Kraft von 0,7 N, 35 beaufschlägt. Bei einer elektrischen Feldstärke von 1kV/mm wurde die piezoelektrische Ladungskonstante  $d_{33}$  als Funktion des piezokeramischen Materials und der Schichtdicke 6 der

15

piezoelektrischen Schicht 4 ermittelt. Es sind  $d_{33}$ -Werte von bis zu 15.000 pm/V erzielbar.

Tabelle 1:

5

Versuch Nr. 1	Piezo- keramik	Curie- Temperatur [°C]	Koerzitiv- feldstärke [kV/mm]	Proben- dicke [μm]	$d_{33}$ [pm/V]
1	Weich-PZT	330	1.0	1000	650
2	Weich-PZT	330	1.0	110	2200
3	Weich-PZT	170	0.5	1000	1150
4	Weich-PZT	170	0.5	260	1600
5	Weich-PZT	170	0.5	120	15000
6	Weich-PZT	120	0.3	1000	1400
7	Weich-PZT	120	0.3	160	3500

**Patentansprüche**

1. Piezoaktor (1) mit
  - mindestens einem stapelförmigen Piezoelement (2), das
    - 5 mindestens zwei entlang einer Stapelrichtung (10) des Piezoelements (2) übereinander angeordnete Elektrodenschichten (7, 8, 9) und mindestens eine jeweils zwischen zwei Elektrodenschichten (7, 8, 9) angeordnete piezoelektrische Schicht (4) aufweist, und
    - 10 - mindestens einer Vorspannvorrichtung (15) zur Krafteinleitung (32) in ein Volumen der piezoelektrischen Schicht (4) über mindestens eine Krafteinleitungsfläche (13, 14, 23, 24) der piezoelektrischen Schicht (4), die an mindestens einem 15 der Vorspannvorrichtung (15) zugekehrten Oberflächenabschnitt (11, 12) der piezoelektrischen Schicht (4) angeordnet ist,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**
    - die Krafteinleitungsfläche (13, 14, 23, 24) kleiner ist 20 als der Oberflächenabschnitt (11, 12) der piezoelektrischen Schicht (4) und das Volumen ein Teilvolumen (5) der piezoelektrischen Schicht (4) ist.
2. Piezoaktor nach Anspruch 1, wobei mehrere 25 Krafteinleitungsflächen (13, 14) derart über die piezoelektrische Schicht (4) verteilt sind, dass es durch die Krafteinleitung zu einer Verbiegung der piezoelektrischen Schicht (4) kommt..
- 30 3. Piezoaktor nach Anspruch 1 oder 2, wobei die piezoelektrische Schicht (4) einen Oberflächenabschnitt (11) mit mindestens einer Krafteinleitungsfläche (13) und einen dem Oberflächenabschnitt (11) abgewandten, weiteren Oberflächenabschnitt (12) mit mindestens einer weiteren Krafteinleitungsfläche (14) aufweist und die 35 Krafteinleitungsflächen (13, 14) bezüglich der

Stapelrichtung (10) des Piezoelements (2) gegeneinander seitlich versetzt sind.

4. Piezoaktor nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die Vorspannvorrichtung (15) und/oder das Piezoelement (2) zur Erzeugung der Krafteinleitungsfläche (13, 14, 23, 24) mindestens eine aus der Gruppe Kugelkalotte (18), Kegelstumpf (19, 29), Quader (30, 31) Ring (17) und/oder Zylinder (21, 22) ausgewählte Bauform aufweisen.
5. Piezoaktor nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei die Krafteinleitungsfläche (23) punktförmig ist.
5. Piezoaktor nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei die Krafteinleitungsfläche (24, 24') streifenförmig ist.
7. Piezoaktor nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei die Krafteinleitungsfläche (23') ringförmig ist.
- O 8. Piezoaktor nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei mindestens drei Krafteinleitungsflächen vorhanden sind, die über den Oberflächenabschnitt (11, 12) der piezoelektrischen Schicht (4) flächig verteilt sind.
9. Piezoaktor nach Anspruch 1 bis 8, wobei mindestens drei Krafteinleitungsflächen vorhanden sind, die am Oberflächenabschnitt (11, 12) der piezoelektrischen Schicht (4) in Reihe (25) angeordnet sind.
- O 10. Piezoaktor nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei einander abgekehrte Oberflächenabschnitte (11, 12) der piezoelektrischen Schicht (4) gleiche und/oder unterschiedlich geformte Krafteinleitungsflächen (13, 14, 23, 24) aufweisen, die entlang der Stapelrichtung (10) gegeneinander versetzt angeordnet sind.

11. Piezoaktor nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei eine Schichtdicke (6) der piezoelektrischen Schicht (4) aus dem Bereich von einschließlich 20 µm bis einschließlich 200 µm ausgewählt ist.

5

12. Piezoaktor nach Anspruch 11, wobei die Krafteinleitungsfläche (13, 14, 23, 24) eine Ausdehnung aufweist, die im Wesentlichen der Schichtdicke (6) der piezoelektrischen Schicht (4) entspricht.

10

13. Piezoaktor nach einem der Ansprüche 1 bis 12, wobei eine Vielzahl von Piezoelementen (2) übereinander gestapelt ist.

15

14. Piezoaktor nach Anspruch 13, wobei mindestens zwei Piezoelemente (2) derart übereinander gestapelt sind, dass Krafteinleitungsflächen (13, 14, 23, 24) der Piezoelemente (2) im Wesentlichen bündig übereinander angeordnet sind.

20

15. Verfahren zum Herstellen eines Piezoaktors (2) nach einem der Ansprüche 1 bis 14 durch Einleiten einer Kraft (32) in ein Teilvolumen (5) der piezoelektrischen Schicht (4) über die Krafteinleitungsfläche (13, 14, 23, 24) der piezoelektrischen Schicht (4) derart, dass in dem Teilvolumen (5) der piezoelektrischen Schicht eine Polarisation (27) quer zur Stapelrichtung (10) erzeugt wird.

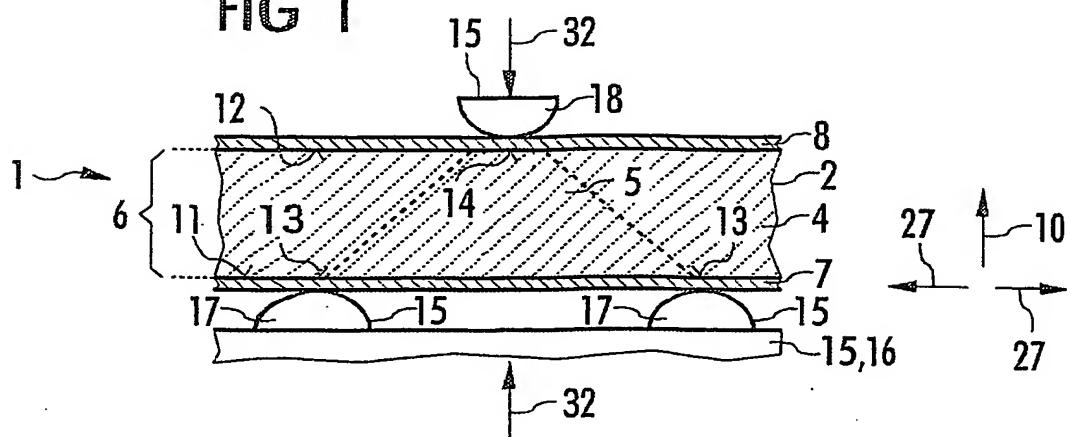
25

30 16. Verfahren nach Anspruch 15, wobei ein Teilvolumen (5) verwendet wird, das sich entlang einer gesamten Schichtdicke (6) der piezoelektrischen Schicht (4) erstreckt.

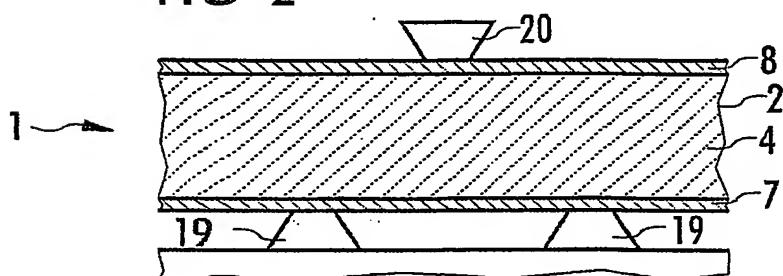
35

17. Verfahren nach Anspruch 15 oder 16, wobei im Teilvolumen (5) eine im Wesentlichen vollständige Polarisation quer zur Stapelrichtung (10) erzeugt wird.

### FIG 1



**FIG 2**



**FIG 3**

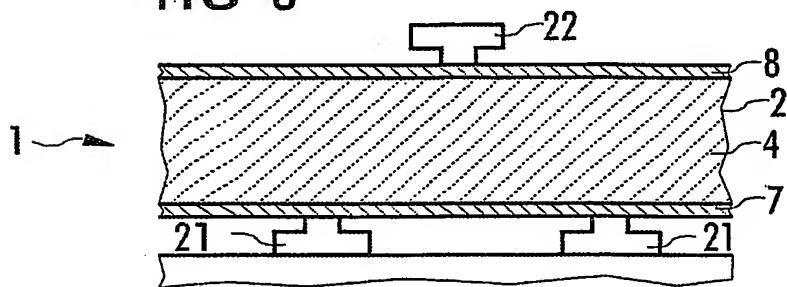
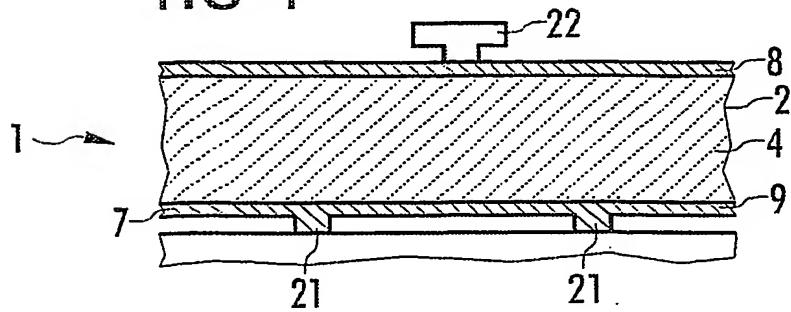


FIG 4



2/4

FIG 5

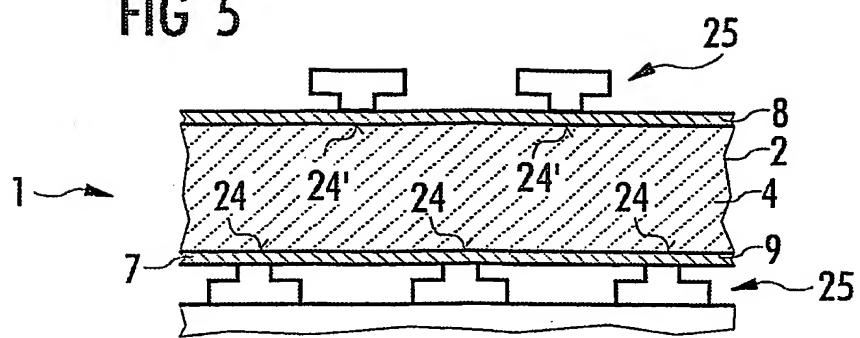


FIG 6

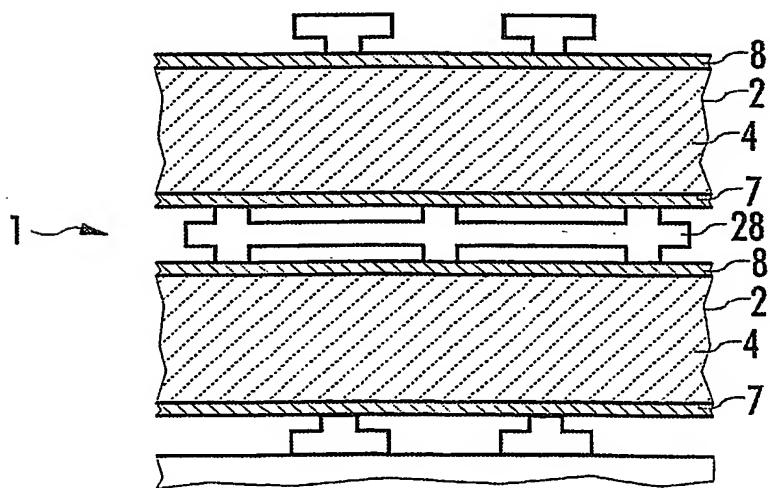


FIG 7

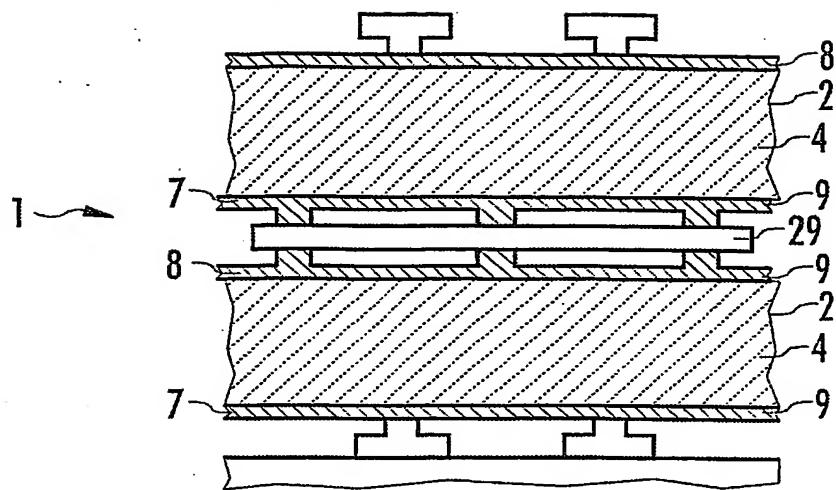


FIG 8

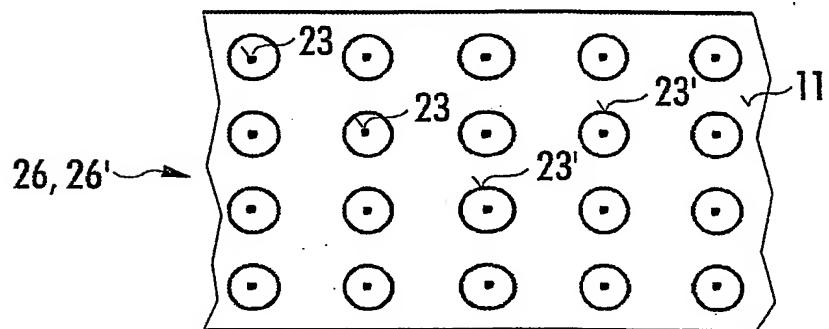
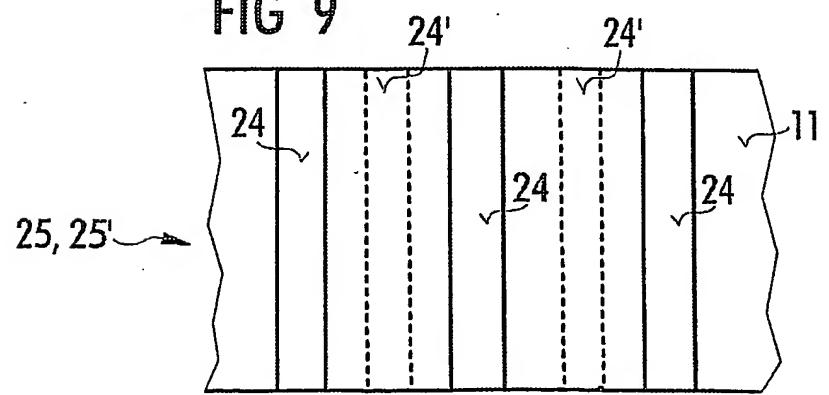
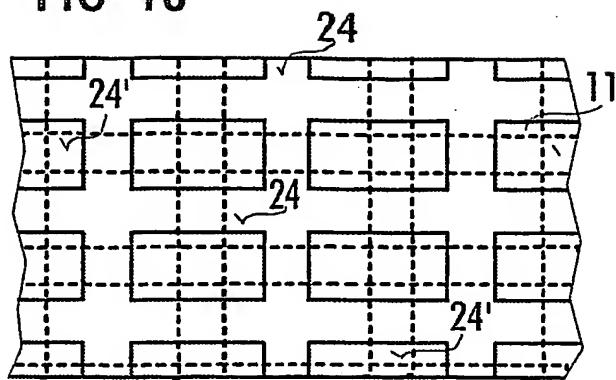
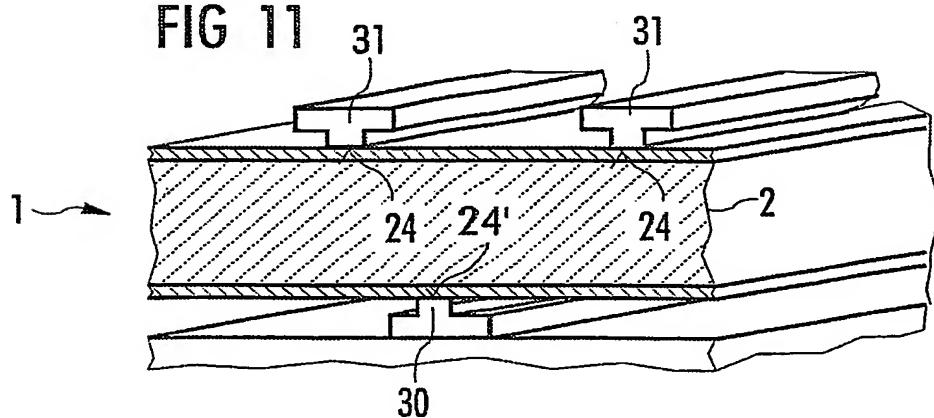


FIG 9



4/4

**FIG 10****FIG 11****FIG 12**